

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Petteri Malinen

KOMPENSOINTI OUTOKUMMUN ENERGIA OY:N  
SÄHKÖVERKOSSA

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2016



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Huhtikuu 2016**  
**Sähkötekniikan koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
013 260 600

Tekijä(t)  
Petteri Malinen

Nimeke  
Kompensointi Outokummun energia Oy:n sähköverkossa

Toimeksiantaja  
Outokummun Energia Oy

**Tiivistelmä**

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää maasulun kompensoinnin toiminta Outokummun energia Oy:n sähköverkossa. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Outokummun Energia Oy.

Outokummun energia Oy:n sähköverkko sijaitsee Outokummun kaupungin taajama-alueella sekä haja-asutusalueella. Outokummun energialla on neljä sähköasemaa. Työssä paneuduttiin vain kolmeen Ruuttu 1, Ruuttu 2 ja Vuonos 1 sähköasemiin.

Työssä selvitettiin laskemalla kolmella sähköasemalla olevat maasulkuvirrat. Maasulkuvirtojen pohjalta tehtävänä oli laatia releasettelut maasulkusuojukselle. Releasettelut ja maasulkuvirrat laskettiin kompensoidulle sähköverkolle ja myös sähköverkon ollessa maasta erotettu.

Kieli  
suomi

Sivuja 49  
Liitteet

**Asiasanat**

Maasulku, Maasulkuvirran kompensointi, Kompensointi



**THESIS**  
**April 2016**  
**Degree programme in electrical engineering**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
013 260 600

Author (s)  
Petteri Malinen

Title  
Compensation in the Outokummun energia Oy electricity network

Commissioned by  
Outokummun energia Oy

**Abstract**

The aim of this thesis was to find out a ground fault compensation operation by Outokummun energia Oy's electricity network. Thesis was assigned by Outokummun energia Oy.

Outokummun energia Oy's electricity grid is located in the town of Outokumpu urban area, as well as in sparsely populated areas in the Outokumpu. Outokumpu's energy has four substations. But the work focused only three of them Ruuttu 1, Ruuttu 2 and Vuonos 1 substations.

In the work I calculate ground fault currents on three substations. Base of ground fault currents was to do relay settings to a ground fault protection. Relay settings and ground fault currents was calculated compensated electricity network and separated from ground electricity network.

Language

Finnish

Pages 49

Appendices

**Keywords**

Ground fault , Ground fault compensation, Compensation

# Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	Maadoitustavat keskijänniteverkossa .....	5
3	Maasulku ja sen teoria.....	7
3.1	Maasulkuvirran ja jännitteiden laskeminen maasta erotetussa verkossa .....	8
3.2	Maasulkuvirran ja jännitteiden laskeminen sammutetussa verkossa .....	11
4	Maasulun suojaus ja releiden asettelu .....	15
5	Maadoitusjännite.....	20
6	Johtorakenteet keskijänniteverkossa maasulkuvirran kannalta .....	22
7	Sammutusjärjestelmän rakenne.....	22
8	Outokummun energia Oy:n sähköverkon maakapasitanssit ja maasulkuvirrat.....	23
8.1	Ruuttu 2 .....	25
8.2	Ruuttu 2 maasta erottuna ja maasulkuvirran laskeminen lähdöittäin.....	29
8.3	Ruuttu 1 maasta erotettuna.....	32
8.4	Ruuttu 1 sammutettuna .....	38
8.5	Vuonos 1 maasta erotettuna.....	40
8.6	Vuonos 1 sammutettuna .....	44
9	Maasulun laukaisuajan asettelu .....	46
10	Pohdinta.....	48
	Lähteet .....	49

## 1 Johdanto

Työn tarkoituksena oli selvittää kompensoinnin toiminta Outokummun energia Oy:n sähköverkossa. Työssä selvitettiin maasulkuvirtojen suuruus Outokummun energian kolmella sähköasemalla. Maasulkuvirtojen suuruus selvitettiin verkon ollessa maasta erotettuna ja verkon ollessa sammutettu eli kompensoitu. Saatujen maasulkuvirtojen pohjalta laskettiin maasulun suojaukseen tarvittavat releiden asetteluarvot. Asetteluarvot laskettiin releille verkon ollessa maasta erotettu sekä verkon ollessa sammutettuna.

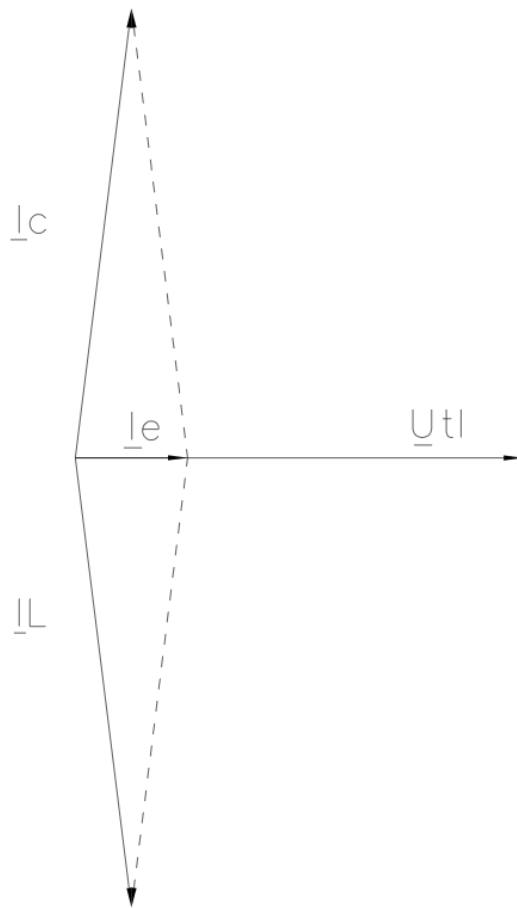
Outokummun energialla on 882,3 km pituinen sähköverkko. Verkosta 211 km on ilmajohtoa ja 113 km on maakaapeliverkkoa. Maakaapeliverkon lisääntyminen aiheuttaa maasulkuvirtojen kasvua. Maakaapelilla on huomattavasti suurempi maakapasitanssi avojohtoon verrattuna. Suuremmasta maakapasitanssista johtuen maasulkuvirrat kasvavat maakaapeloinnin lisääntyessä.

Maasulkuvirran pienentämiseksi on aiheellista muuttaa maasta erotettu sähköverkko sammutetuksi verkoksi. Verkon sammuttaminen tarkoittaa sitä, että maakapasitansseista johtuva kapasitiivinen virta kumotaan verkontähtipisteen ja maan välille asennettavalla sammutuskuristimella. Kelan induktiivinen virta kumoaa kapasitiivista virtaa.

## 2 Maadoitustavat keskijänniteverkossa

Keskijänniteverkossa käytetään yleensä maasta erotettua tai sammutettua verkkoa. Maasta erotetun verkon rakenne on sellainen, että sähköverkon tähtipiste on erotettu maasta. Tässä tapauksessa verkon tähtipisteen impedanssi on suuri, johtuen vain johtojen ja kaapelien maakapasitanssista. Maakapasitanssin suuruuteen vaikuttaa galvaanisesti yhteen kytkettyjen johtojen pituus. Suuresta impedanssista johtuen maasta erotetun verkon maasulkuvirta on pieni. Sammutettu

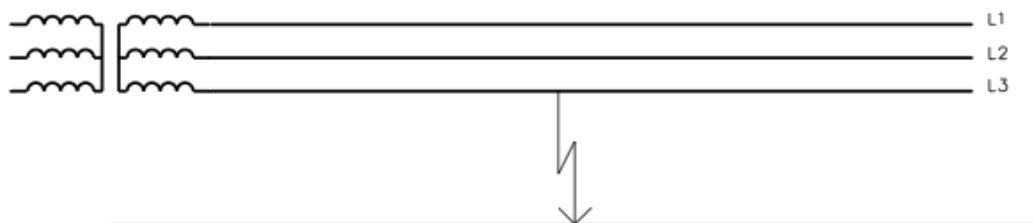
verkko on maasta erotetun verkon johdannainen. Siinä muuntajan ja tähtipisteen välillä on induktanssi, jonka suuruus on melkein vastaava kuin keskijänniteverkon maakapasitanssista johtuva reaktanssi. Koska maakapasitanssista ja sammutuskuristimesta johtuvat virrat ovat melkein  $180^\circ$  vaihesiirrossa toisiaan nähden, niin virrat kumoavat toisensa. Kuitenkin virroilla on pieni resistiivinen osa, josta aiheutuu maasulkuvirta  $I_e$ . (Lakervi & Partanen 2009, s. 182; Elovaara & Laiho 2001, s. 84) Tämä on havainnollistettu kuvassa 1 osoitinpiirroksena.



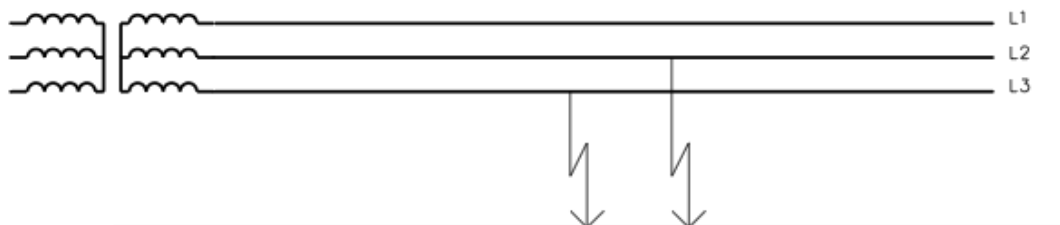
**Kuva 1. Induktiivisen ja kapasitiivisen virran kumoutuminen (Elovaara & Haarla 2011, s. 211).**

### 3 Maasulku ja sen teoria

Maasulku tarkoittaa vaihejohtimen kosketusta maahan tai maadoitettuun osaan. Tällöin vaihejohtimen ja maan välille aiheutuu maasulkuvirta. Maasulkuvirran suuruus riippuu vikaresistanssin suuruudesta vikapaikassa, vaihejohtimien impedanssista ja maasta erotetussa verkossa verkon maakapasitanssista. Maasulun aikana maasta erotetussa verkossa vaihe- ja tähtipistejännitteet muuttuvat (Lakervi & Partanen 2009, s. 182). Kuvissa 2 ja 3 on esitetty yksivaiheinen- ja kaksoismaasulku.



**Kuva 2. Maasulku (Aura & Tonteri 1993, s. 180)**



**Kuva 3. Kaksoismaasulku (Lakervi & Partanen 2009, s. 198)**

Maasulkuvirran suuruus riippuu verkon rakenteesta, eli onko verkko maasta erotettu vai sammutettu, sekä siitä miten paljon keskijänniteverkkoa on sähköaseman päämuuntajan perään galvaanisesti kytketty. Avojohtolla maasulkuvirran suuruus on noin 0,067 A per kilometri avojohtoverkkoa. Maakaapelista aiheutuva

maasulkuvirta on huomattavasti suurempi kuin avojohdoilla, noin 2,7-4A per kilometri maakaapelia, eli verkon kokonaispituuden kasvaessa maasulkuvirta kasvaa. Maasulun aikainen vikaresistanssi vaikuttaa tähtipistejännitteeseen, maasulkuvirtaan ja terveiden vaiheiden jänniteisiin. Vikaresistanssin ollessa nolla tähtipistejännite kasvaa vaihejännitteen suuruiseksi, puolestaan muiden vaiheiden joissa ei ole maasulkua eli ns. terveet vaiheet niiden jännite kohoaa pääjännitteen suuruiseksi. Vaihejännite on nollassa vaiheessa, jossa maasulku sijaitsee. Tapauksissa, joissa vikaresistanssi on suuri, niin maasulkuvirta ja tähtipistejännite pienenevät. Tällaisia tapauksia ovat kuivat puut linjoilla sekä yleensä eristetyillä PAS-johdoilla esiintyvät maasulut. Suurilla vikaresistansseilla on maasulun havaitseminen hankalaa maasulkuvirran sekä tähtipistejännitteen pienyyden vuoksi. (Lakervi & Partanen 2009, s. 186)

### 3.1 Maasulkuvirran ja jännitteiden laskeminen maasta erotetussa verkossa

Maasulun aikana kulkevia virtoja on havainnollistettu kuvassa 5. Maasulkuvirran itseisarvo saadaan laskettua maakapasitanssin kautta maasta erotetusta verkosta kaavan 1 avulla (Aura ja Tonteri 1993, s.164)

$$I_e = \sqrt{3} * \omega * C * U \quad (1)$$

jossa,

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

$\omega$  on  $2 * \pi * f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

$C$  Verkon maakapasitanssi per vaihe [F]

$U$  on verkon pääjännite [V]

(Aura & Tonteri 1993 s. 164)

Maasulkuvirran laskeminen maasululle, jossa esiintyy vikaresistanssia, tapahtuu kaavalla 2. (Lakervi & Partanen 2009, s. 195)



$$I_e = \frac{3\omega C}{\sqrt{1+(3\omega CR_f)^2}} * U_v \quad (2)$$

jossa,

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

$C$  on verkon vaiheen maakapasitanssi [F]

$R_f$  on vikaresistanssi [ $\Omega$ ]

$U_v$  on verkon vaihejännite [V]

$\omega$  on  $2*\pi*f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

Maasulun aikana aiheutuu myös jännitemuutoksia, jännite-epäsymmetria ja verkonnollajännitteen muutoksia. Nollajännitteen, eli jännitteen, joka on verkonnollapisteeseen ja maan välillä, voi laskea kaavalla 3

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C} * I_e \quad (3)$$

jossa,

$U_0$  on nollajännite [V]

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

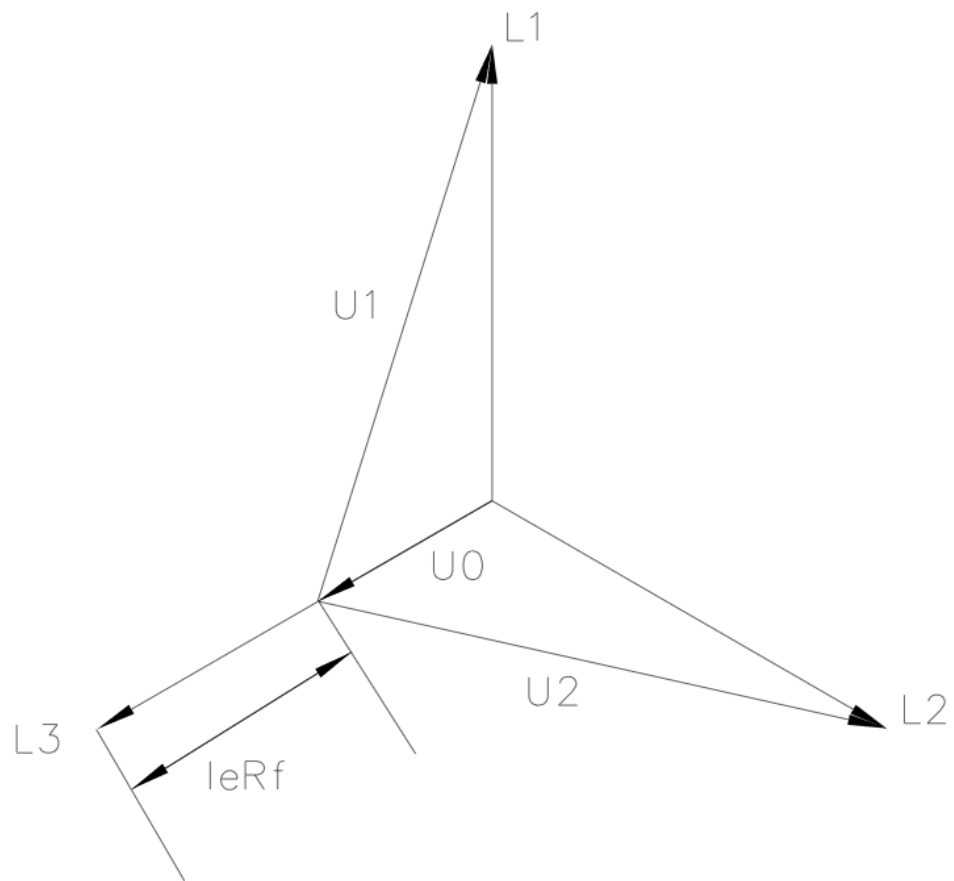
$\omega$  on  $2*\pi*f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

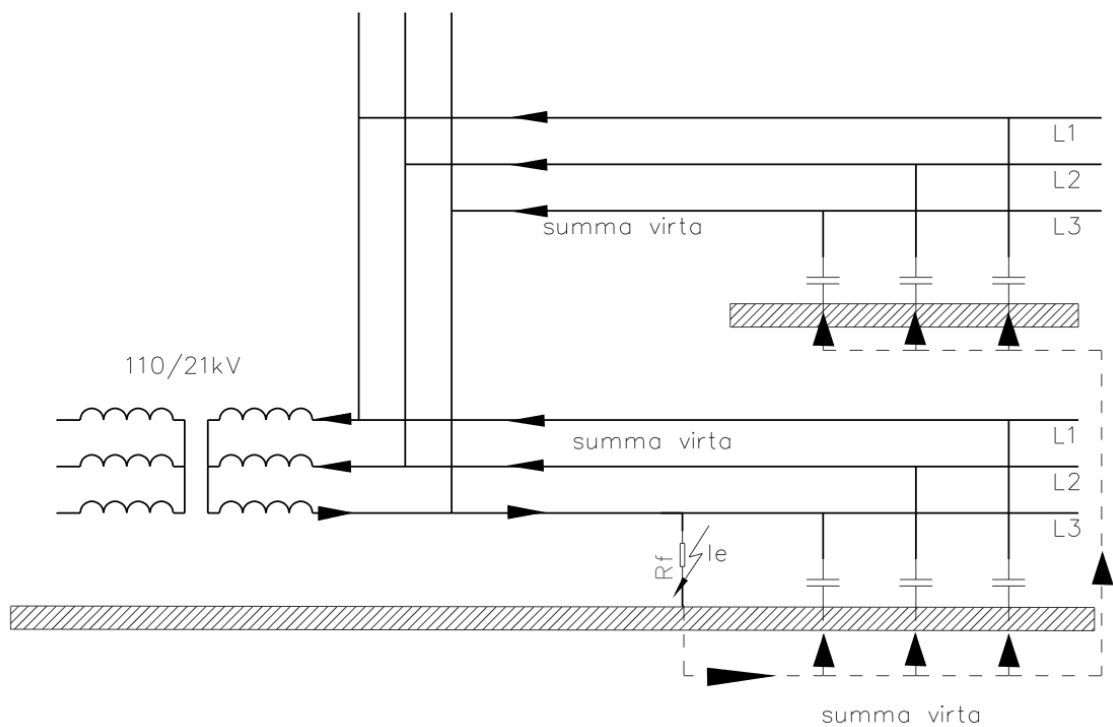
$C$  on verkon vaiheen maakapasitanssi [F]

(Aura & Tonteri 1993, s. 164)

Jännite-epäsymmetrian ja nollajännitteen muutokset maahan nähden voidaan esittää myös osoitin piirroksena. Osoitin piirros kuvassa 4 osoitin piirroksessa  $U_0$  on nollajännite,  $U_1$  ja  $U_2$  ovat terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten maasulun aikana.  $L_1$ ,  $L_2$  ja  $L_3$  kuvastavat vaiheiden jännitettä normaalissa käyttötilanteessa.  $I_{eRf}$  on puolestaan vaihejännite maata vasten vaiheessa jossa on maasulku. (Aura & Tonteri 1993, s. 165)



**Kuva 4. Jännitteet maasulun aikana (Lakervi & Partanen 2009, s. 187)**



**Kuva 5. Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa. (Lakervi & Partanen 2009, s. 183)**

### 3.2 Maasulkuvirran ja jännitteiden laskeminen sammutetussa verkossa

Sammutetussa verkossa on maasulkuvirta kompensoitu maan ja verkon tähtipisteen välille asetetulla induktanssilla. Sammutus toimii sähköverkossa vain tietyillä johtopituudella. Johtopituuden muuttuessa on muutettava myös sammutuskelan induktanssia samassa suhteessa. Induktanssi kumoaa johtokapasitansseista johtuvaa summavirtaa maasulun aikana aiheuttaen noin 180°n vaihesiirrolla olevan nollapistevirran. Asiaa havainnollistaa kuva 1. Tällä tavoin vikapaikassa oleva vikavirta sammutetaan lähes nollaan, eli täysin sammutetussa verkossa pätee kaava 4. (Aura & Tonteri 1993, s. 165).

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C} \quad (4)$$

Jossa,

$L$  on sammutus kelan induktanssi [H]

$\omega$  on  $2\pi f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

$C$  on verkon vaiheen maakapasitanssi [F]

Puolestaan verkon nollajännite saadaan laskettua kaavalla 5. Kaava on likimääräinen.

$$U_0 = 3 * \omega^2 * L * C * U_v \quad (5)$$

jossa,

$U_0$  on nollajännite [V]

$\omega$  on  $2\pi f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

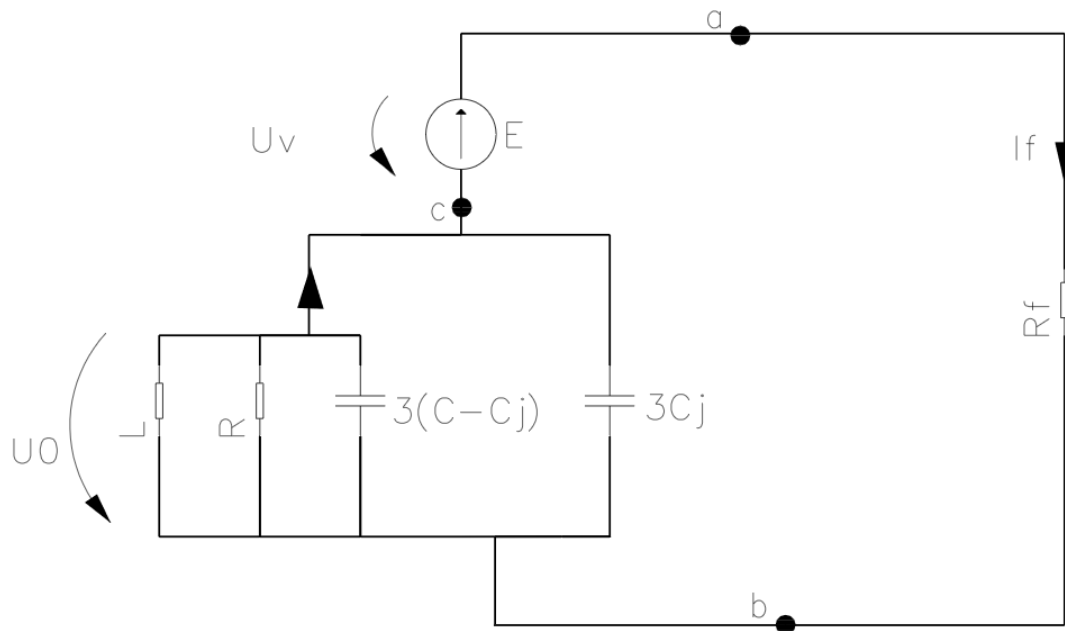
$C$  on verkon vaiheen maakapasitanssi [F]

$L$  on sammutuskelan induktanssi [H]

$U_v$  on verkon vaihejännite

(Aura & Tonteri 1993, s. 165)

Maasulkuvirta sammutetussa verkossa muodostuu pääasiassa sammutuskuristimen rinnalla olevasta lisävastuksesta. Näin ollen lisävastuksen suuruus määrää maasulkuvirran suuruuden. (Lakervi & Partanen 2009, s. 193). Sammutetun verkon maasulusta voidaan piirtää sijaiskytkentä kuva 6.



**Kuva 6. Sijaiskytkentä sammutetusta verkosta. (Lakervi & Partanen 2009, s. 185)**

Kuvan 6 sijaiskytkennästä saadaan johdettua kaava maasulkuvirralle (kaava 6). Kaava 7 on johdettu versio joka käy tilanteessa jossa verkko on täysin kompensoitu.

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}} \quad (6)$$

(Lakervi & Partanen 2009 s. 185)

$$I_f = \frac{1}{R_o + R_f} * \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

(ABB 2000, s. 8)

jossa,

$I_f$  on maasulkuvirta [A]

$U_v$  on vaihejännite [V]

$R_f$  on vikaresistanssi [ $\Omega$ ]

$R$  on lisävastuksen resistanssi [ $\Omega$ ]

$\omega$  on  $2\pi f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

$C$  on verkon vaiheen maakapasitanssi [F]

$L$  on sammutuskelan induktanssi [H]

$R_0$  on verkon häviöresistanssi [ $\Omega$ ]

$U$  on verkon pääjännite [V]

Verkon häviö resistanssin  $R_0$  saadaan laskettua kaavalla 8.

$$R_0 = 15 * \frac{U}{\frac{\sqrt{3}}{I_{EM}}} \quad (8)$$

jossa;

$R_0$  = verkon häviöresistanssi [ $\Omega$ ]

$U$  = Verkon pääjännite [V]

$I_{EM}$  = verkon maasulkuvirta [A]

(Isotalo 2010, s.42)

Myös nollapiste jännitteelle saadaan johdettua sijaiskytkennästä tarkempi kaava (kaava 9)

$$U_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f(3\omega C - \frac{1}{\omega L})} * U_v \quad (9)$$

(Lakervi & Partanen 2009, s. 186)

Nollapiste jännitteelle on vielä yksi kaava 10 jolla voidaan nollajännite laskea vi-  
karesistanssin ja verkon häviöresistanssien avulla

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{R_0}{R_0 + R_f} \quad (10)$$

Jossa,

$U_0$  on nollapisteenjännite [V]

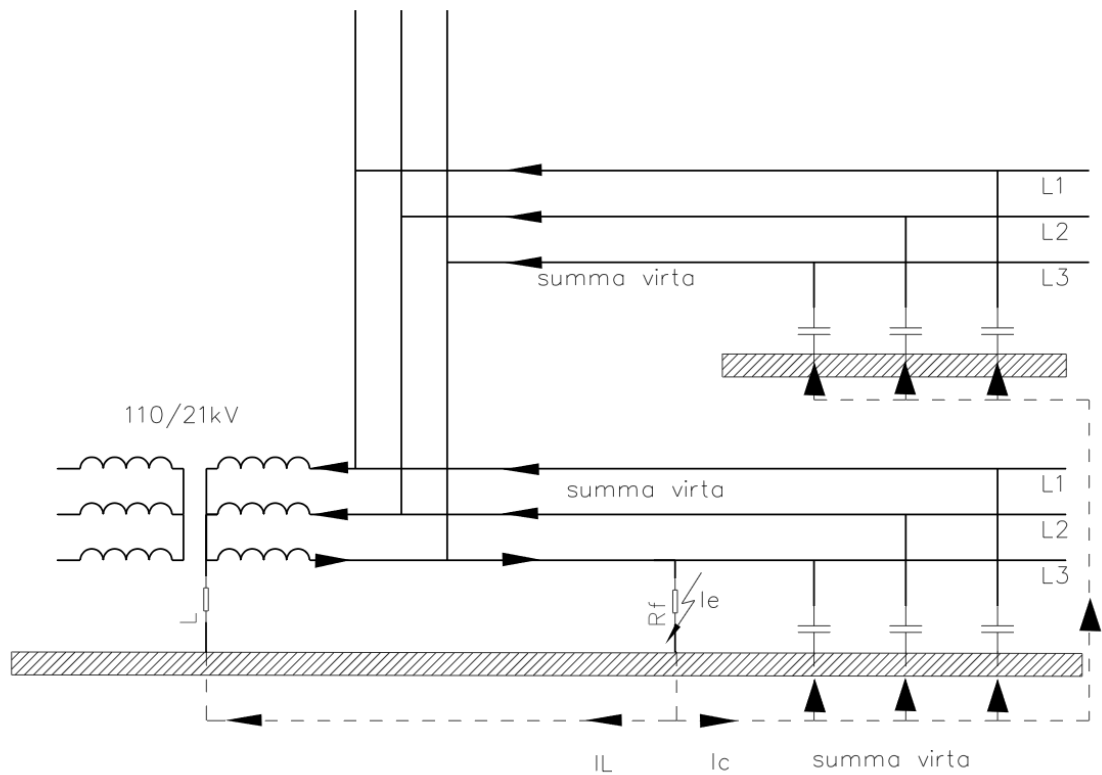
$U_v$  on vaihejännite [V]

$R_0$  on verkon häviöresistanssi [ $\Omega$ ]

$R_f$  on vikaresistanssi [ $\Omega$ ]

(ABB 2000, s. 9)

Sammutetun verkon kytkentää ja maasulkuvirtojen kulkua on havainnollistettu kuvassa 6.

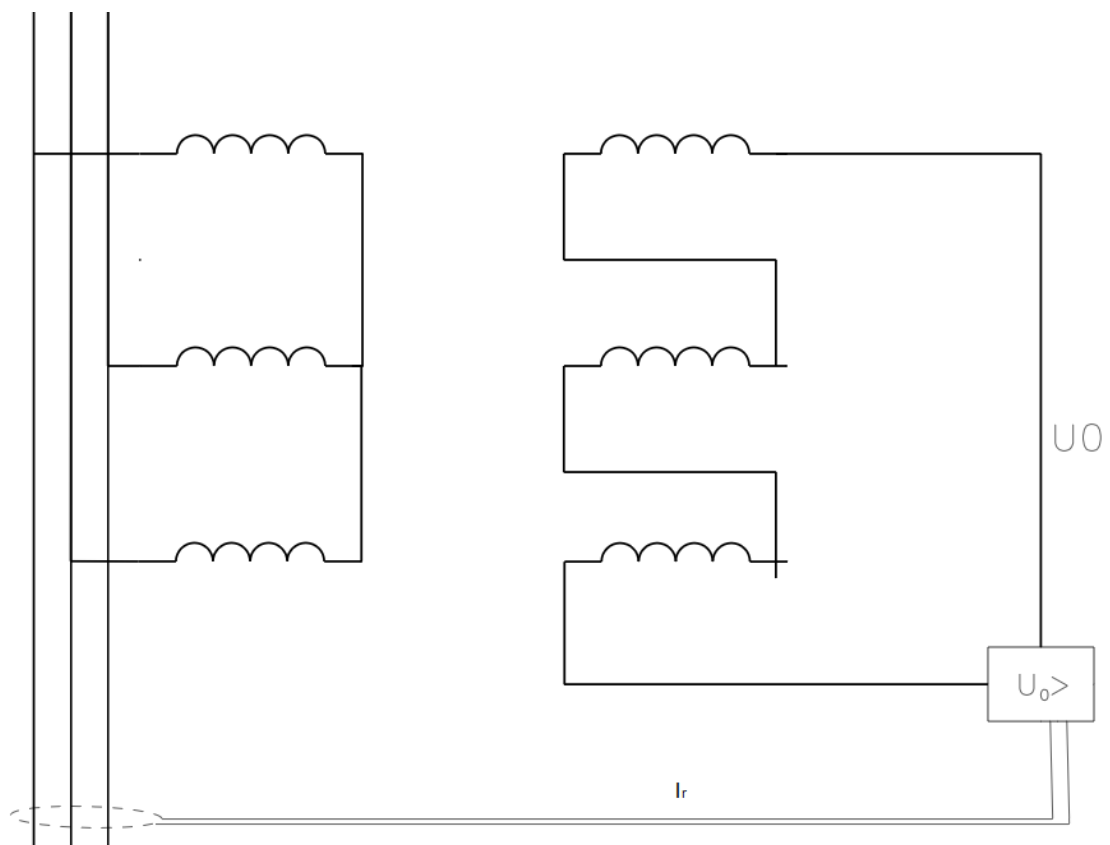


**Kuva 7. Maasulku sammutetussa verkossa. (Aura & Tonteri 1993, s.166)**

#### 4 Maasulun suojaus ja releiden asettelu

Maasulkua ei voi suojata oikosulun tapaan ylivirtasuojalla maasta erotetussa verkossa. Maasta erotetussa verkossa maasulun aikainen vikavirta on niin pieni, että

sitä ei voida erottaa normaalista kuormitusvirrasta. Maasulkuvirta on joissain tapauksissa kuormitusvirtaakin pienempi, joten maasulun havaitsemiseen käytetään erilaisia tapoja. Näitä ovat tähtipistejännitteen muutos, vaihejännitteiden muutos, summavirta, jännitteissä ja virroissa esiintyvät yliaallot, sekä suurtaajuisiamuutosvirtoja, maasulkuvirrassa on viidettä yliaaltoa. Suojaukseen käytetään maasulkusuuntareleita. Suuntareleissä maasulun havaitseminen johtuu vaihevirtojen epäsymmetrisyydestä ja tähtipisteenjännitteen noususta. Vaihevirtojen epäsymmetria saadaan selville vaihevirtojen osoittimien summasta. Tähtipistejännite saadaan mitattua johtolähtöön sijoitetulla jännitemuuntajien avokolmiokytkennällä. (Lakervi & Partanen 2009, s. 190)



**Kuva 8. Tähtipistejännitteen mittaaminen sekä summavirran mittaaminen.**  
(Lakervi & Partanen 2009, s. 190)

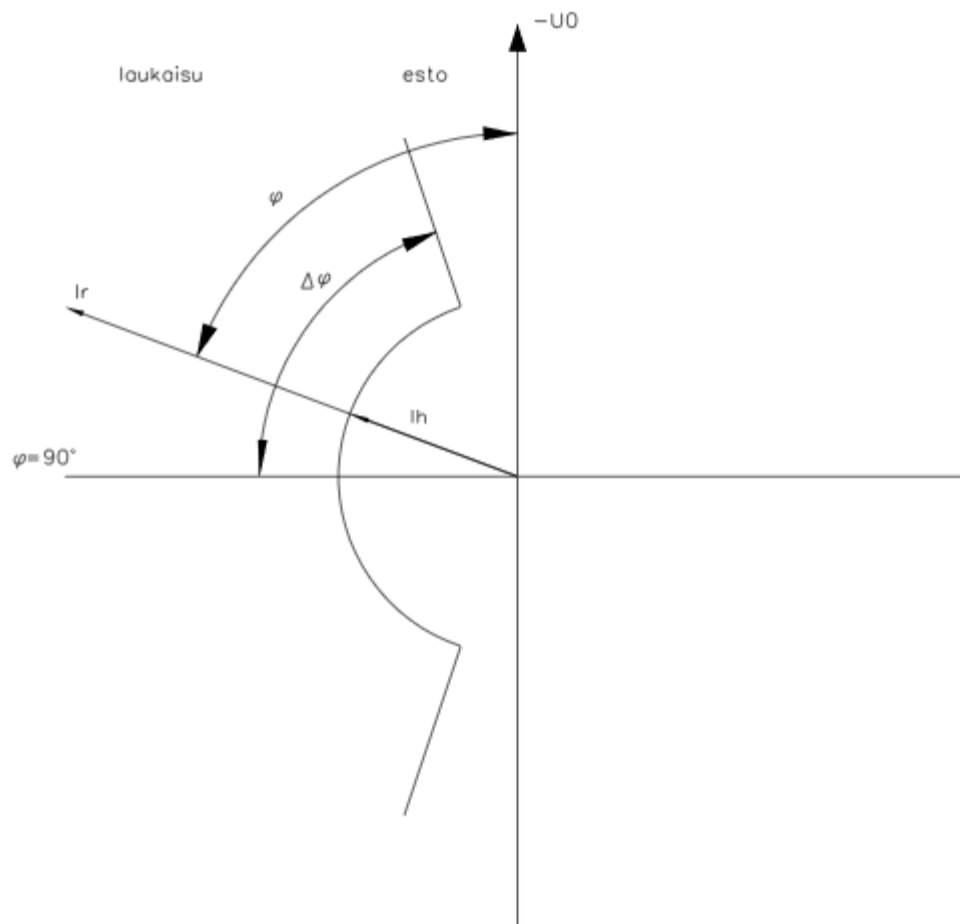
Releiden toiminnan edellytyksenä maasulun suojauksen kannalta on että viallisenlädön kautta kulkeva maasulkuvirta ylittää releen asetteluarvot. Releiden ehtona pitää muistaa summavirran kulkusuunta eli laukaisu tapahtuu silloin kun vikavirta suuntautuu vikapaikkaan päin eikä kiskostoon päin. Maasulkuvirran



suunta määritetään vertaamalla tähtipiste jännitteen ja summavirtamuuntajan läpi kulkevan virran osoittimien kulmaa. Virta on noin  $90^\circ$  edellä tähtipistejännitettä. Releen toiminnanehdoksi tulee kaava 11.

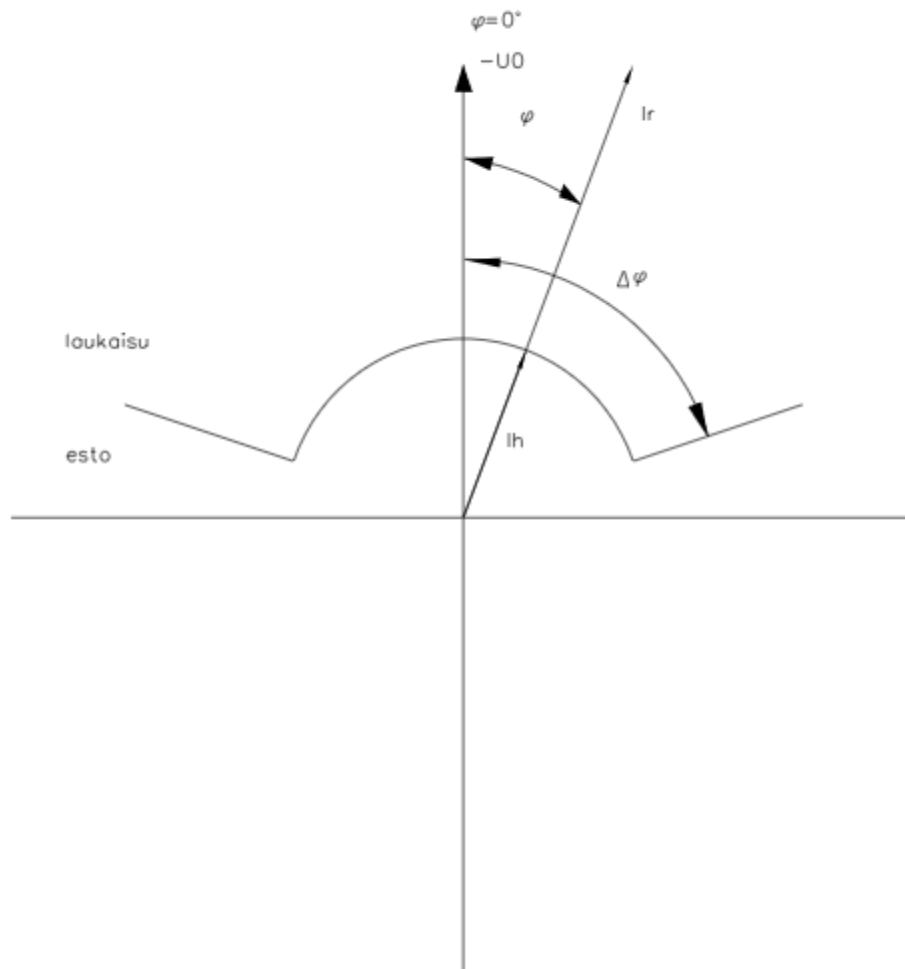
$$90^\circ - \Delta\varphi < \varphi < 90^\circ + \Delta\varphi \quad (11)$$

Toleranssi  $\Delta\varphi$  voi olla maasta erotetussa verkossa pienikin, mutta sammutetussa verkossa on kulman muodostuminen paljon epämääräisempää, toleranssina voidaan käyttää  $80^\circ$  (Lakervi & Partanen 2009, s. 192). Kuvissa 9 ja 10 on esitetty maasta erotetun ja sammutetun verkon releiden toimintaehtoja summavirran ja tähtipistejännitteen kulmaeron mukaan.



**Kuva 9. releen havahtumiskulmat maasta erotetussa verkossa.**

(Lakervi & Partanen 2009, s. 192)

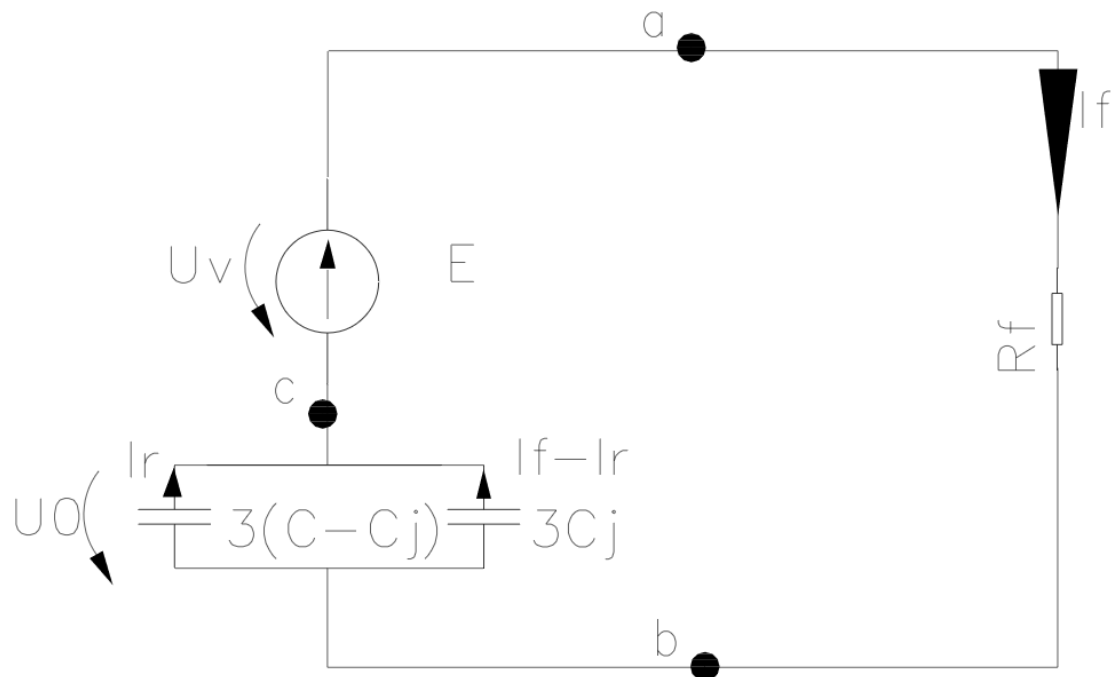


**Kuva 10. Releen havahtumiskulmat sammutetussa verkossa. (Lakervi & Partanen 2009, s. 192)**

Sammutetussa verkossa releen havahtumisen ehtona on niin kuin maasta erotetussa verkossakin että lähdön kautta kulkeva maasulkuvirta  $I_e$  ja tähtipistejännite  $U_0$  ylittävät asetteluarvot. Sammutetussa verkossa negatiivisen tähtipistejännitteen ja nollavirrankulmaero on enintään  $\pm\Delta\varphi$ . Sammutetussa verkossa maasulkuvirta muodostuu pääasiassa sammutuskuristimen lisävastuksen lävitse kulkevasta virrasta. (Lakervi & Partanen 2009, s. 192-193)

Viottuneen johtolähdön maasulkuvirta voidaan määrittää sijaiskytkennän avulla sijaiskytkennästä kuva 11, jossa  $I_f$  on maasulkuvirta  $I_r$  on johtolähdön kautta

kulkeva maasulkuvirta  $C_j$  on tarkasteltavan johtolähdön maakapasitanssi ja  $C$  on koko verkon maakapasitanssi.



**Kuva 11. Sijaiskytkentä maasulkutilanteessa jossa on usempi lähtö kytketty (Lakervi & Partanen 2009, s.191)**

Kuvasta 11 saadaan jodettu kaava 12. Kaavasta 12 saadaan ratkaistua vioittuneen johtolähdön kautta kulkeva vikavirta  $I_r$ .

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} * I_f \quad (12)$$

jossa,

$I_r$  on johto lähdön kautta kulkeva maasulkuvirta [A]

$C$  on verkon maakapasitanssi per vaihe [F]

$C_j$  on johtolähdön maakapasitanssi [F]

$I_f$  on maasulkuvirta [A]

(Lakervi ja Partanen 2009 195)

## 5 Maadoitusjännite

Maasulun aikana maasulkuvirta aiheuttaa maadoitusjännitteen vikapaikassa. Maadoitusjännitteen suuruuteen vaikuttaa maasulkuvirta sekä maadoitusresistanssi yhtälössä 13 esitetysti.

$$U_m = I_e * R_m \quad (13)$$

jossa,

$U_m$  on maadoitusjännite [V]

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

$R_m$  on maadoitusresistanssi [ $\Omega$ ]

Maadoitusjännitteestä aiheutuu kosketusjännite, joka on ihmisten ja eläinten kosketeltavissa vikapaikassa aiheuttaen näin mahdollisen sähköiskun. (Lakervi & Partanen 2009, s. 187 - 188). Standardissa SFS 6001 määritellään sallitut arvot kosketusjännitteelle  $U_{TP}$ . Maadoitusjännitteen maksimiarvo ei saa ylittää kaavassa 14 esitettyä arvoa.

$$U_m \leq k * U_{TP} \quad (14)$$

jossa,

$U_m$  on maadoitusjännite [V]

$U_{TP}$  on kosketusjännite [V]

$k$  on kerroin

Yhtälössä 14  $k$  on kerroin jonka suuruuteen vaikuttaa maadoitusolosuhteet. Taivoitetaso kertoimella on 2, jolloin muuntamo ja pienjänniteverkko maadoitetaan

standardien mukaan. Muuntamalla keski- ja pienjänniteverkkojen maadoitukset on yhdistettävä jos vain tämä on mahdollista. Jos tavoitetasoa ei saavuteta taloudellisten tai teknisten seikkojen vuoksi, niin kertoimen  $k$  voidaan käyttää arvoa 4. Tähän ehtoina ovat huono maadoitusolosuhde, sekä muuntamolle tehtävä potentiaalinhjaus tai jokaisen pienjännitejohtohaaran maadoittaminen pituudesta riippumatta. Tilanteessa jossa koko muuntopiirin alue on huonosti johtavaa vaikka kalliota voidaan kertoimen  $k$  arvona käyttää arvoa 5, tällaisessa tilanteessa on seuraavien ehtojen toteuduttava, jokaisella liittijällä on oltava maadoitus ja muuntamalla on oltava potentiaalinhjaus. Tilanteessa jossa edellisiä ehtoja ei saada varmistettua, on liittijän rakennuksen ympärille tehtävä potentiaalinhjaus. Suurin sallittu maadoitusresistanssi saadaan selville katsoamalla taulukosta 1 maasulun laukaisu-ajan mukaan sallittu kosketusjännite  $U_{TP}$ .

**Taulukko 1. Kosketusjännitteet laukaisuajan suhteen (Lakervi & Partanen 2009, s. 188)**

Lau- kaisu aika (s)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{TP}$ (V)	390	280	215	160	132	120	110	110

Tämän jälkeen yhtälöllä 14 ratkaistaan maadoitusjännite laukaisuakaa vastaava kosketus jännitearvoa  $U_{TP}$  ja kerrointa  $k$  käyttämällä. Tämän jälkeen ratkaistaan maadoitusresistanssi yhtälöllä 15.

$$R_m = \frac{U_m}{I_e} \quad (15)$$

jossa,

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

$U_m$  on maadoitusjännite [V]

$R_m$  on maadoitusresistanssi [ $\Omega$ ]

Maadoitusjännitevaatimuksiin päästään kolmella eri tavalla. Näitä ovat maadoitusten parantaminen, lyhentämällä maasulunsuojauksen laukaisuaikaa sekä pienentämällä maasulkuvirtaa. Maasulkuvirran pienentäminen onnistuu jakamalla verkkoa pienempiin osiin, eli lisäämällä päämuuntajia tai tekemällä verkosta sammutettu. (Lakervi & Partanen 2009, s. 187 - 189).

## **6 Johtorakenteet keskijänniteverkossa maasulkuvirran kannalta**

Johtorakenteita on kahdenlaista keskijänniteverkossa, on kaapeli- ja ilmajohtorakenteita. Ilmajohdot ovat pylväisiin asennettuja johtimia tai kaapelia. Avojohto on ilmajohtojen yksimuoto. Avojohtoilla on johtimet kiinnitetty erikseen eristimillä kiinni pylvääseen PAS-johto kuuluu myös avojohtoihin. Riippukierrehdot ja riippukaapelijohdot ovat, ilmajohtoja ne ovat kiinteästi eristettyjä. (Elovaara & Laiho 2001, s. 351). Kaapeleilla on huomattavasti suurempi maakapasitanssi ja maakapasitanssi aiheuttaa suuremman maasulkuvirran näin ollen maakaapeloinnin lisääntyessä maasulkuvirrat kasvavat ja tulee aiheelliseksi pienentää maasulkuvirtoja kompensoimalla. (Lakervi & Partanen 2009, s. 186)

## **7 Sammutusjärjestelmän rakenne**

Sammutusjärjestelmä koostuu sammutuskuristimesta maadoitusmuuntajasta ja sammutuskuristimen rinnalle lisättävästä lisävastuksesta. Käytännössä sammutusjärjestelmässä verkon tähtipisteen ja maan väliin asennetaan sammutuskuristin. Verkontähtipistettä ei yleensä ole saatavilla suoraan. Sen takia sammutus kuristimelle joudutaan rakentamaan maadoitusmuuntaja

tähtipisteen saamiseksi. Tämän lisäksi sammutuskelan on oltava säädettävissä verkon eri käyttötilanteiden mukaan. Sammutuskelan rinnalle kytketään yleensä lisävastus. Lisävastuksella aiheutetaan maasulkuvirtaa koska, kompensoinnin ollessa käytössä niin maakapasitansseista ja sammutuskelan induktanssista johtuvat virrat kumoavat toisensa ja näin ollen maasulkua ei pystytä havaitsemaan. Lisävastus kuitenkin päästää maasulkuvirtaa läpi ja näin ollen aiheuttaa maasulkuvirran joka pystytään havaitsemaan. (Elovaara & Haarla 2011, s. 210).

Sammutusjärjestelmän mitoituksessa on huomioitava että järjestelmä kestää esiintyvät maasulkuvirrat ja myös eri käyttötilanteiden virrat esimerkiksi varasyöttö tilanteet. Myös olisi hyvä huomioda verkon laajeneminen. Outokummun energian sähköverkon maadoitus muuntajien kilpiarvot ovat. Ruuttu 1 nimellisteho on 2000 kvar nimellisvirta 169 A ja nimellisjännite 20500 V muuntajan kytkentäryhmä on ZNyn11. Ruuttu 2 nimellisteho 1600 kvar nimellisvirta 135 A ja nimellisjännite 20500 V muuntajan kytkentäryhmä on ZNyn11. Vuonos nimellisteho 1250 kvar nimellisvirta 105 A ja nimellisjännite 20500 V muuntajan kytkentäryhmä on ZNyn11. Sammutuskelojen kilpiarvot ovat. Ruuttu1 nimellisteho 1,6 / 2000 kVA nimellisjännite 11840 V. Ruuttu2 nimellisteho 1,6/1600 kVA nimellisjännite 11840 V. Vuonos 1 nimellisteho 1,0/1250 kVA nimellisjännite 11840 V. Lisävastukset ovat kaikilla asemilla samanlaiset kaksiporaiset teholtaan 50/100 kW, nimellisjännitteeltään 500 V ja nimellisvirraltaan 200 A / 90 s.

## **8 Outokummun energia Oy:n sähköverkon maakapasitanssit ja maasulkuvirrat**

Tehtävänä oli laskea Outokummun energia Oy:n sähköverkon maasulkuvirrat ja maakapasitanssit ja mitoittaa sammutusjärjestelmät sähköasemille. Myös suo-

jaukseen tarvittavat releasettelut laskettiin sähköasemille johtolähdöittäin sammutetussa verkossa ja tilanteessa jossa verkossa ei ole sammutus käytössä vaan verkko on maasta erotettu. Laskennassa huomiotiin tilanteet joissa yksi sähköasema syöttää muiden sähköasemien verkkoja. Outokummun energialla on neljä sähköasemaa, Ruuttu1, Ruuttu2, Vuonos1 ja Vuonos2. Näistä sähköasemista kompensointi tulee vain Ruuttu1, Ruuttu2 ja Vuonos1 sähköasemille. Ruuttu1 ja Ruuttu2 sijaitsevat vierekkäin Outokummun keskustan länsipuolella ja vuono1 sijaitsee Outokummun keskustan itä puolella. Maasulkuvirran arvot kaapeleittain AHXAMK-W 20kV kaapeleille saatiin Prysmian tuoteluettelosta (Prysmian 2009, s. 71). Vanhoille paperieristeisille kaapeleille saatiin maasulkuvirran arvot ABB:n käsikirjasta (ABB 2000, s. 3). Maasulkuvirran arvoista laskettiin maakapasitanssit kaavan 16 johdannaisella.

$$C = \frac{I_e}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot U} \quad (16)$$

jossa,

$C$  on maakapasitanssi per vaihe [F]

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

$\omega$  on  $2 \cdot \pi \cdot f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

$U$  on verkon pääjännite

(Aura ja Tonteri 1993 s.164)

Ilmajohdoille laskettiin maasulkuvirrat puolestaan maakapasitanssista kaavalla

1. Seuraavaksi laskettiin maasulkuvirrat sähköasemittain ja johtolähdöittäin edellisistä kaavoista saaduilla arvoilla ja lähtöjen kaapeli ja johtopituuksia käyttämällä. Taulukossa 2 on esitetty kaapeli tyypit ja niiden maasulkuvirtojen ja maakapasitanssien arvot. (Prysmian 2009, s. 71; ABB s. 3; Lakervi 1996, s. 55)



**Taulukko 2 Maasulkuvirrat ja maakapasitanssit johto tyypittäin**

	Maasulku- virta	Maakapasi- tanssi
	A/km	nF/km
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu	2,60	238,91
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	2,50	229,72
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu	2,30	211,34
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu	2,00	183,78
APYAKMM 3*185Al	4,00	367,55
APYAKMM 3*150 Al	3,70	339,99
APYAKMM 3*120 Al	3,50	321,61
APYAKMM 3*95 Al	3,20	294,04
APYAKMM 3*70 Al	2,80	257,29
APYAKMM 3*35 Al	2,30	211,34
Ilmajohto(avojohto)	0,07	6,00
Ilmajohto(PAS)	0,07	6,00

## 8.1 Ruutu 2

Sähköasema Ruutu 2 syöttää pääasiassa ilmajohtoverkkoa Viuruniemen, Kuusjärven, Lappalan ja Lähtevän suuntaan. Ilmajohtoverkkoa on 182 km ja maakaapeli-verkkoa on 1,719 km. Taulukosta 3 käy ilmi johtopituudet, maakapasitanssit ja maasulkuvirrat Ruutu 2 sähköasemalla johtolähdöittäin.

**Taulukko 3 Ruuttu 2 johtolähdöt**

Asema	Ruuttu2		
Lähtö	J02 Kuusjärvi	Maasulkuvirta A	Maakapasitanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	201,80	0,50	46,36
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	40352,26	2,63	242,11
Ilmajohto(PAS)	5624,65	0,37	33,75
Yhteensä	46178,71	3,51	322,22
Asema	Ruuttu2		
Lähtö	J05 vuiru-niemi	Maasulkuvirta A	Maakapasitanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	110,85	0,28	25,46
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00

AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avajohto)	57933,52	3,78	347,60
Ilmajohto(PAS)	1846,56	0,12	11,08
Yhteensä	59890,93	4,18	384,14
Asema	Ruuttu2		
Lähtö	J06 Läh- tevä	Maasulkuvirta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	922,65	2,31	211,95
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu	295,67	0,59	54,34
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al	0,22	0,00	0,06
APYAKMM 3*70 Al	66,50	0,19	17,11
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avajohto)	42094,86	2,75	252,57
Ilmajohto(PAS)	2575,06	0,17	15,45
Yhteensä	45954,96	6,00	551,48

Asema	Ruuttu2		
Lähtö	J07 Lap- pala	Maasulkuvirta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	121,68	0,30	27,95
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	31653,96	2,07	189,92
Ilmajohto(PAS)		0,00	0,00
Yhteensä	31775,64	2,37	217,88
Ruuttu2	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF	
Yhteensä	16,06	1475,72	

Taulukon 3 arvoista laskettiin releiden asetteluarvot tilanteeseen jossa verkko on maasta erotettu. Laskennassa käytettiin tilannetta jossa verkon tilanne oli huonoin maasulun kannalta eli kytkettynä oli vain tarkasteltava johtolähtö sekä johtolähtö jolla on pienin maasulkuvirta vikaresistanssin ollessa 500  $\Omega$ . Kaavaan 12 sijoittamalla maasulkuvirran, tarkasteltavan johtolähdön maakapasitanssin ja verkon maakapasitanssi saadaan lähdön kautta kulkeva maasulkuvirta. Ruuttu

2 sähköasemalla pienin maasulkuvirta ja maakapasitanssi on Lappalan lähdössä.

## 8.2 Ruuttu 2 maasta erottuna ja maasulkuvirran laskeminen lähdöittäin

Ensiksi tarkastellaan J06 Kuusjärvi lähtöä maasulkuvirran kannalta tilanteessa jossa on vain lähtö J07 Lappala kytkettynä. Verkko on maasta erotettu. Kaavalla 2 ratkaistaan maasulkuvirta joka kulkee vikaresistanssin  $R_f$  kautta joka on suuruudeltaan 500  $\Omega$ . Verkon pääjännitteenä käytetään 20 kV. Verkon maakapasitanssit saadaan taulukosta 4. Kaavasta 2 saatiin maasulkuvirraksi  $I_f$  5,69 A. Seuraavaksi laskettiin viallisen lähdön kautta kulkevan maasulkuvirran käyttäen kaavaa 12. Viallisen lähdön kautta kulkeva maasulkuvirta  $I_f$  on suuruudeltaan 3,39 A. Taulukossa 4 on esitetty neljän muun lähdön kautta kulkeva maasulkuvirta sekä releiden asetteluarvot. Nollajännite lasketaan myös hankalimmassa tilanteessa kaavalla 17 eli, kaikki lähdöt kytkettyinä, eli verkon maakapasitanssi on suurimmillaan ja näin ollen nollajännite on pienimmillään.

$$U_o = \frac{1}{\sqrt{1+(3\omega * C * R_f)^2}} * U_v \quad (17)$$

jossa,

$U_o$  on nollajännite [V]

$\omega$  on  $2 * \pi * f$

$f$  on verkon käyttötaajuus [Hz]

$C$  on verkon maakapasitanssi per vaihe [F]

$R_f$  on vikavastus [ $\Omega$ ]

$U_v$  on vaihejännite [V]

(Aura ja Tonteri 1993 s.164)

Nollajännitteen arvoksi saatiin kaavalla 17 9483 V ja  $U_{oh}$  on 82 %

**Taulukko 4 Ruutu 2 maasulkuvirrat ja releiden asetteluarvot.**

Lähtö	maasulku- virta $I_f$ A	Lähdön kautta kul- keva maa- sulkuvirta $I_r$ A	Releen asettelu- arvo	$U_{oh}$ %	$\varphi$ °
J02 kuus- järvi	5,69	2,29	2	80	90
J05 Viuru- niemi	6,30	2,27	2	80	90
J06 Lähtevä	7,86	2,22	2	80	90
J07 Lappala	5,69	3,39	3	80	90

Verkon ollessa sammutettu maasulkuvirta muodostuu lähinnä kompensointi ke-  
lan rinnalla olevasta lisävastuksesta. Verkon ollessa sammutettu releiden aset-  
telu toteutettiin niin että oletettiin verkon olevan täysin sammutettu. Lisävastuk-  
sena on kaksiporainen 50/100 kW nimellisjännitteeltään 500 V ja virraltaan 200  
A / 90 s oleva lisävastus Näistä arvoista saadaan vastuksen arvo joka on 2,5  $\Omega$ .  
Kaavaan 4 sijoittamalla verkon maakapasitanssit saadaan ratkaistua kompen-  
sointikelan induktanssi. Maakapasitanssit Ruutu 2 sähköasemalle saadaan tau-  
lukosta 3  $C=1475,72$  nF. Kompensointi kelan induktanssi  $L$  on näin ollen 2,29H.  
Verkon häviöresistanssi arvo laskettiin kaavalla 8 ja kaavaan 7 sijoittamalla ar-  
vot saatiin maasulkuvirta laskettua tilanteessa jossa verkko on täysin kompen-  
soitu. Verkon häviöresistanssin  $R_0$  arvoksi sain 10798  $\Omega$  käyttäen maasulkuvir-  
tana taulukon 3 arvoa 16,06 A. Kompensoidun verkon maasulkuvirraksi sain  
1,02 A vikaresistanssin ollessa 500  $\Omega$  ja suorassa maasulussa 1,07 A. Nollajän-  
nite laskettiin kaavalla 5. Nollajännitteen arvoksi saatiin 11536,6 V. Kaavalla 10  
laskettuna arvoksi saatiin puolestaan 11036 V. Releiden asettelu hankalim-  
massa tilanteessa eli kytkettynä vain tarkasteltava johtolähtö sekä pienimmän  
maakapasitanssin omaava johtolähtö käy ilmi taulukosta 5

**Taulukko 5. Ruutu 2 releiden asettelu sammutettu verkko ja maasulkuvirran arvoja.**

Lähtö	Maasulku- virta $I_f$ A	Lähdön kautta kul- keva maa- sulkuvirta $I_r$ A	Releen- asettelu arvo	$U_{oh}$ %	$\varphi$ °
J02 kuus- järvi	0,39	0,39	0,3	90	80
J05 Viuru- niemi	0,43	0,42	0,3	90	80
J06 Lähtevä	0,54	0,54	0,3	90	80
J07 Lappala	0,39	0,39	0,3	90	80
Lähdön kautta kulkevia maasulku virtoja eri vika- resistanssin arvolla					
	0,5k $\Omega$	1K $\Omega$	1,5k $\Omega$	3k $\Omega$	
J02 Kuusjärvi	0,39A	0,38A	0,37A	0,36A	
J05 viurunieni	0,43A	0,42A	0,41A	0,39A	
J06 Lähtevä	0,55A	0,53A	0,52A	0,49A	
J07 Lappala	0,39A	0,38A	0,37A	0,36A	

Taulukosta 6 käy ilmi maasulkuvirran ja nollajännitteen arvoja eri vikaresistansseilla sammutetussa verkossa sekä maasta erotetussa verkossa kaikkien johtolähtöjen ollessa kytkettyinä. Näin ollen maasulkuvirta on suurimmillaan ja myöskin nollajännite.

**Taulukko 6 Maasulkuvirran ja nollajännitteen arvoja eri vikaresistansseilla  
Ruutu 2**

Vikaresistanssi $R_f \Omega$	Maasulkuvirta sammutetussa verkossa. A	Nollajän- nite sam- mutettu- verkko V	Maasulkuvirta maasta erote- tussa verkossa. A	Nollajännite maasta erotettu verkko V
0	1,07	11553	16,06	11547
500	1,02	11013	13,18	9481
1000	0,98	10582	9,37	4663
3000	0,84	9070	3,74	2692

### 8.3 Ruutu 1 maasta erotettuna

Ruutu 1 sähköasema syöttää pääasiassa maakaapeli verkkoa Outokummun kaupungin taajama-alueella. Verkko kostuu pääasiassa maakaapelista, pieniä pätkiä ilmajohtoa on verkossa. Taulukossa 7 näkyy johtotyyppien pituudet ja maasulkuvirrat sekä maakapasitanssit. Releasettelut ja maasulkuvirrat laskettiin samalla tavalla kuin Ruutu 2 sähköasemalle.

**Taulukko 7 Ruutu 1 kaapeli pituudet lähdöittäin**

Asema	Ruutu1		
Lähtö	J02 Kyykeri		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu	1124,520073	2,92	268,66
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	7851,36232	19,63	1803,62



AHXAMK-W 3*95Al+35Cu	119,0736218	0,27	25,17
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al	0,127238262	0,00	0,04
APYAKMM 3*120 Al	201,5910184	0,71	64,83
APYAKMM 3*95 Al	0,232446493	0,00	0,07
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al	859,591755	1,98	181,67
Ilmajohto(avojohto)	394,1452016	0,03	2,36
Ilmajohto(PAS)	1284,888028	0,08	7,71
Yhteensä		25,62	2354,13
Asema	Ruuttu1		
Lähtö	Teollisuus- kylä j05		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu	227,75	0,59	54,41
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	1009,26	2,52	231,85
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	67,42	0,24	21,68
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00

Ilmajohto(avojohito)	2,38	0,00	0,01
Ilmajohto(PAS)		0,00	0,00
Yhteensä		3,35	307,96
Asema	Ruuttu1		
Lähtö	J06 Miilu		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	4065,52	10,16	933,93
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	61,5	0,22	19,78
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al	261,25	0,73	67,22
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohito)		0,00	0,00
Ilmajohto(PAS)	143,56	0,01	0,86
Yhteensä		11,12	1021,79
Asema	Ruuttu1		
Lähtö	J09 Teolli- suuskylä		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00

AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	869,9	2,17	199,83
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	29,4	0,10	9,46
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	1899,66	0,12	11,40
Ilmajohto(PAS)		0,00	0,00
Yhteensä		2,40	220,69
Asema	Ruuttu1		
Lähtö	J10 hotelli		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	1859,4	4,65	427,14
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu	41,8	0,08	7,68
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	396,3	1,39	127,45
APYAKMM 3*95 Al	313,8	1,00	92,27
APYAKMM 3*70 Al	228,5	0,64	58,79

APYAKMM 3*35 Al	171,4	0,39	36,22
Ilmajohto(avojohto)		0,00	0,00
Ilmajohto(PAS)		0,00	0,00
Yhteensä		8,16	749,56
Asema	Ruuttu1		
Lähtö	J11 Partala		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	3265	8,16	750,04
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	226,86	0,79	72,96
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	1916,185	0,13	11,50
Ilmajohto(PAS)	1361	0,09	8,17
Yhteensä		9,17	842,66
Asema	Ruuttu1		
Lähtö	J12 Apteekki		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00

AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	1095,5	2,74	251,66
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al	318,1	1,27	116,92
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	313,2	1,10	100,73
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al	542,5	1,52	139,58
APYAKMM 3*35 Al	474	1,09	100,18
Ilmajohto(avojohto)		0,00	0,00
Ilmajohto(PAS)		0,00	0,00
Yhteensä		7,72	709,06
Koko aseman		Maasulku- virta A	Maakapasi- tanssi nF
Yhteensä		67,54	6205,84

Ensiksi laskettiin taulukon 7 arvoista releiden asetteluarvot verkon ollessa maasta erotettu. Kytkeytyä oli vain tarkasteltava johtolähtö ja pienimmän maasulkuvirran omaava johtolähtö. Vikaresistanssin  $R_f$  arvona käytettiin 500  $\Omega$ . Ruutu 1 asemalla pienin maasulkuvirta on johtolähdössä J09 Teollisuuskylä. Näin ollen tarkastellaan J09 teollisuuskylän johtolähtöä sekä johtolähtö jolle määritetään maasulkuvirtaa sekä releasettelua. J09 Teollisuuskylää tarkasteltaessa lisäksi kytkettynä on J05 Teollisuuskylä. Maasulkuvirta johtolähdöille saadaan ratkaistua kaavalla 2. Johtolähdön kautta kulkeva maasulkuvirta ratkaistaan kaavalla 12. Nollajännite ratkaistaan kaavalla 16 tilanteessa jossa kaikki johtolähdöt on kytkettyinä. Nollapistejännitteeksi sain 3736 V ja  $U_{oh}$  on 32 % Taulukosta 8 käy ilmi releasettelut ja maasulkuvirrat johtolähdöittäin.

**Taulukko 8 Ruutu 1 releidenasettelu maasta erotettu**

Lähtö	Maasulkuvirta $I_r$ A	Lähdön kautta kulkeva maasulkuvirta $I_r$ A	Releen asettelu-arvo	$U_{oh}$ %	$\varphi$ °
J02 Kyykeri	17,82	1,53	1,2	30	90
J05 Teollisuuskylä	5,58	2,33	2	30	90
J06 Miilu	11,66	2,07	2	30	90
J09 Teollisuuskylä	5,58	0,58	0,4	30	90
J10 Hotelli	9,60	2,18	2	30	90
J11 Partala	10,34	2,15	2	30	90
J12 Apteekki	9,26	2,20	2	30	90

#### 8.4 Ruutu 1 sammutettuna

Ruutu 1 sähköaseman syöttävän verkon olleessa sammutettu verkon maasulkuvirta muodostuu lähinnä kompensointikelan rinnalle kytketystä lisävastuksesta. Lisävastus on samanlainen kuin Ruutu 2 sähköasemalla eli kaksi portainen 50 / 100 kW nimellijännite 500 V virraltaan 200 A / 90 s ja vastus on 2,5  $\Omega$ . Kaavasta 4 saatiin kompensointikelan induktanssi verkon ollessa täysin kompensoitu verkon maakapasitanssi saadaan taulukosta 5. Kapasitanssi  $C$  on 6205 nF ja kompensointikelan induktanssi on 0,544 H. Sähköverkon häviöresistanssin laskettiin kaavalla 8. Häviöresistanssin arvoksi saatiin 2566  $\Omega$ . Maasulkuvirran arvo laskettiin kaavalla 7. Maasulkuvirta on 3,77 A vikaresistanssin ollessa 500  $\Omega$ . Taulukosta 9 käy ilmi maasulkuvirrat lähdöittäin hankalimmassa tilanteessa eli vain johtolähtö jolla pienin maakapasitanssi ja tarkasteltava johtolähtö kytkettyinä. Nollapistejännite on kaavan 5 mukaan 11529 V ja releenasetteluksi 90 %

**Taulukko 9 Ruutu 1 releidenasettelu ja maasulkuvirrat sammutettu verkko**

Lähtö	Maasulku- virta $I_f$ A	Lähdön kautta kulkeva maa- sulkuvirta $I_r$ A	Releen asettelu- arvo	$U_{oh}$ %	$\varphi$ °
J02 Kyykeri	1,73	1,73	1,5	90	80
J05 Teolli- suuskylä	0,38	0,38	0,3	90	80
J06 Miilu	0,88	0,88	0,5	90	80
J09 Teolli- suuskylä	0,38	0,38	0,3	90	80
J10 Hotelli	0,68	0,68	0,5	90	80
J11 Partala	0,75	0,75	0,5	90	80
J12 Apteekki	0,66	0,66	0,5	90	80
Lähdön kautta kulkevia maa- sulkuvirtoja eri vikaresistans- seilla					
Vikaresis- tanssi	0 $\Omega$	500 $\Omega$	1000 $\Omega$	1500 $\Omega$	3000 $\Omega$
Maasulkuvirta	A	A	A	A	A
J02 Kyykeri	1,87	1,73	1,61	1,50	1,26
J05 Teolli- suuskylä	0,38	0,38	0,37	0,37	0,35
J06 Miilu	0,90	0,87	0,84	0,81	0,73
J09 Teolli- suuskylä	0,38	0,38	0,37	0,37	0,35
J10 Hotelli	0,70	0,68	0,66	0,64	0,60
J11 Partala	0,77	0,75	0,72	0,70	0,64
J12 Apteekki	0,67	0,66	0,64	0,62	0,57

Taulukossa 10 on esitetty Ruutu 1 aseman maasulkuvirrat eri vikaresistansseilla kaikkien johtolähtöjen ollessa kytkettynä. Tilanteissa joissa sähköverkko on maasta erotettu ja sammutettu.

**Taulukko 10 maasulkuvirran ja nollajännitteen arvot eri vikaresistansseilla Ruutu1**

Vikaresistanssi $R_f \Omega$	Maasulkuvirta sammutettuna verkkona A	Nollajän- nite sam- mutettu- verkko V	Maasulkuvirta maasta erotettuna verkkona A	Nollajännite maasta erotettu V
0	4,5	11547	67,5	11547
500	3,77	9673	21,85	3737
1000	3,24	8313	11,38	1308
3000	2,07	5311	3,84	657

## 8.5 Vuonos 1 maasta erotettuna

Vuonos 1 sähköasemalle laskettiin maasulkuvirrat sekä maakapasitanssit lähdöittäin. Taulukossa 11 käy ilmi johtojen maasulkuvirran sekä maakapasitanssin arvot lähdöittäin ja johto tyypeittäin.

**Taulukko 11 Maasulkuvirrat ja maakapasitanssit lähdöittäin**

Asema	Vuonos1		
Lähtö	J01 Töri- sevä		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasitanssi nF



AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	330,9	0,83	76,01
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	32694	2,13	196,16
Ilmajohto(PAS)	7269,1	0,47	43,61
Yhteensä	40294	3,436711633	315,7930715
Asema	Vuonos1		
Lähtö	J03 Ke- retti		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasitanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	2358,3	5,90	541,75
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00

APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	11823	0,77	70,94
Ilmajohto(PAS)	4321,6	0,28	25,93
Yhteensä	18502,9	6,949940348	638,6171559
Asema	Vuonos1		
Lähtö	J05 Kala- ton		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasitanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	394	0,99	90,51
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	11465,1	0,75	68,79
Ilmajohto(PAS)	2515,9	0,16	15,10
Yhteensä	14375	1,897914241	174,395827
Asema	Vuonos1		

Lähtö	J13 Konvaara		
Johtotyyppi	Pituus M	Maasulku- virta A	Maakapasitanssi nF
AHXAMK-W 3*150Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*120Al+35Cu	11,5	0,03	2,64
AHXAMK-W 3*95Al+35Cu		0,00	0,00
AHXAMK-W 3*70Al+35Cu		0,00	0,00
APYAKMM 3*185Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*150 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*120 Al	141	0,49	45,35
APYAKMM 3*95 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*70 Al		0,00	0,00
APYAKMM 3*35 Al		0,00	0,00
Ilmajohto(avojohto)	33984	2,22	203,90
Ilmajohto(PAS)	781,9	0,05	4,69
Yhteensä	34918,4	2,792351223	256,5839859

Seuraavaksi määriteltiin maasulkuvirran arvot maasta erotetulle verkolle lähdöittäin verkon tilanteen ollessa huonoimmillaan. Vikaresistanssina käytettiin laskuissa 500  $\Omega$  arvoa. Pienimmän maasulkuvirran omaava johtolähtö Vuonos 1 asemalla on J05 Kalaton. Eli J05 Kalaton johtolähtö ja tarkasteltava johtolähtö on kytkettynä laskettaessa johtolähdön kautta kulkevaa virtaa. J05 Kalaton lähtöä tarkasteltaessa kytkettynä on J13 Kokonvaara. Maasulkuvirran arvo johtolähdölle ratkaistiin kaavalla 2. Kunkin johtolähdön kautta kulkevan maasulkuvirran ratkaistiin kaavalla 12. Nollajännitteen arvo laskettiin kaavalla 16. Nolla jännitteen arvo on 9670 V ja 83,7 %. Taulukossa 12 on esitetty lähdöittäin maasulkuvirrat sekä releasettelut.

**Taulukko 12 Releasettelut lähdöittäin**

Lähtö	Maasulku- virta $I_r$ A	Lähdön kautta kul- keva maa- sulkuvirta $I_r$ A	Releen asettelu- arvo	$U_{oh}$ %	$\varphi$ °
J01 Törisevä	5,2	1,85	1,5	80	90
J03 Keretti	8,26	1,77	1,5	80	90
J05 Kalaton	4,59	2,74	2,5	80	90
J13 Kokon- vaara	4,59	1,86	1,5	80	90

## 8.6 Vuonos 1 sammutettuna

Seuraavaksi määritettiin verkon maasulkuvirran arvot verkon ollessa sammutettu. Tässäkin tapauksessa maasulkuvirta koostuu kompensointikelan rinnalle kytketyn lisävastuksen kautta kulkevasta virrasta. Vastuksen nimellisjännite on 500 V, vastus on kaksiportainen 50 / 100 kW nimellisivirraltaan 200 A / 90 s. Kompensointikelan induktanssi verkon ollessa täysin sammutettu on 2,44 H tämä ratkaistiin kaavalla 4. Vuonos 1 aseman sähköverkon maakapasitanssi on 1385,39 nF. Verkon häviöresistanssi ratkaistiin kaavalla 8 ja verkon ollessa täysin kytketty häviöresistanssi on 11486  $\Omega$ . Maasulkuvirran laskemiseen käytettiin kaavaa 7 ja koko verkon maasulkuvirta 500  $\Omega$  vikavastuksella on 0,96 A. Taulukosta 13 käy ilmi releiden asettelu vuonos 1 sähköasemalle. Tähtipistejännite kohoaa hankalimmassa verkon tilanteessa 11546V eli kun kaikki lähdöt on kytkettyinä.

**Taulukko 13 Vuonos 1 releiden asetteluarvot ja maasulkuvirran arvoja**

Lähtö	Maasulku- virta $I_r$ A	Lähdön kautta kul- keva maa- sulkuvirta $I_r$ A	Releen asettelu- arvo	$U_{oh}$ %	$\varphi$ °
J01 Törisevä	5,33	0,35	0,3	90	80
J03 Keretti	8,85	0,58	0,3	90	80
J05 Kalaton	4,69	0,31	0,2	90	80
J13 Kokon- vaara	4,69	0,31	0,2	90	80
Lähdön kautta kul- keva maa- sulkuvirta eri vikaresis- tansseilla					
Vikaresis- tanssi	0 $\Omega$	500 $\Omega$	1000 $\Omega$	1500 $\Omega$	3000 $\Omega$
Maasulku- virta	A	A	A	A	A
J01 Törisevä	0,36	0,35	0,35	0,34	0,33
J03 Keretti	0,59	0,58	0,56	0,55	0,51
J05 Kalaton	0,31	0,31	0,30	0,30	0,29
J13 Kokon- vaara	0,31	0,31	0,30	0,30	0,29

Taulukosta 14 käy ilmi maasulkuvirran suuruudet ja nollajännitteen arvot eri vikaresistanssin arvoilla verkon ollessa sammutettu ja myös maasta erotettuna.

**Taulukko 14 Maasulkuvirtoja ja nollajännitteitä eri vikaresistansseilla**

Vikaresistanssi $R_f \Omega$	Maasulkuvirta sammutettuna verkkona A	Nollajännite sammutettu verkko	Maasulkuvirta maasta erotettuna verkkona A	Nollajännite maasta erotettu verkko
0	1,00	11486	15,07	11547
500	0,96	11026	12,62	9670
1000	0,92	10567	9,16	5252
3000	0,80	9188	3,73	2857

## 9 Maasulun laukaisuaajan asettelu

Maasulun laukaisuaika aseteltiin Verkon ollessa maasta erotettu sekä sammutettuna. Laukaisuaika laskettiin kaavalla 17. Lasketusta ajasta vähennetään releen toiminta-aika. Laukaisuaikaan vaikuttaa maadoitusvastus sekä maasulkuvirta. Maasulkuvirtana käytettiin suurinta esiintyvää maasulkuvirtaa. Eli tilanteessa jossa kaikki johtolähdöt ovat kytkettyinä ja vikaresistanssi on nolla.

$$t = \left( \frac{500V}{R_m * I_e} \right)^2 \quad (17)$$

(ABB 2000, s. 21)

jossa,

$t$  on laukaisuaika [s]

$R_m$  on maadoitusvastus [ $\Omega$ ]

$I_e$  on maasulkuvirta [A]

Taulukosta 15 käy ilmi lasketut laukaisuaajat eri sähköasemilla. Ja käytetyt maadoitusvastukset sekä maasulkuvirta. Käytännön syistä laukaisuaikaa ei nostettu yli 0,7 s.

**Taulukko 15 Laukaisuaajat**

Ruutu 1	Sammu- tettu	Maasta ero- tettu	Sammu- tettu	Maasta ero- tettu
Maasulkuvirta [A]	4,5	67,5	4,5	67,5
Maadoitusvastus [ $\Omega$ ]	12	12	10	10
Maadoitusjännite [V]	54	810	45	675
$U_{tp}$ [V]	27	405	22,5	337,5
Laukaisuaika [s]	85,73	0,38	123,46	0,55
Ruutu 2				
Maasulkuvirta [A]	1,07	16,06	1,07	16,06
Maadoitusvastus [ $\Omega$ ]	45	45	10	10
Maadoitusjännite [V]	48,15	722,7	10,7	160,6
$U_{tp}$ [V]	24,075	361,35	5,35	80,3
Laukaisuaika [s]	107,83	0,48	2183,60	9,69
Vuonos 1				
Maasulkuvirta [A]	1	15,07	1	15,07
Maadoitusvastus [ $\Omega$ ]	45	45	10	10
Maadoitusjännite [V]	45	678,15	10	150,7
$U_{tp}$ [V]	22,5	339,075	5	75,35
Laukaisuaika [s]	123,46	0,54	2500	11,01

## 10 Pohdinta

Opinnäytetyössä laadittiin maasulunsuojaukselle releasetteluarvot, sekä selvitettiin esiintyvät maasulkuvirrat ja nollajännitteet. Releasettelut laadittiin sammutetulle verkolle sekä maasta erotetulle verkolle.

Opinnäytetyö aloitettiin perehtymällä maasulkuun ja maasulun kompensointiin. Ongelmia oli löytää materiaalia maasulun suojauksen asetteluun eli virta-arvoihin ja laukaisuaikaan.

Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet selvittämällä maasulun suojauksen asetteluarvot ja eri vikatilanteissa esiintyvät maasulkuvirrat.

Laadituilla asetusarvoilla toimeksiantaja pääsee testaamaan maasulun suojauksen toimintaa kevään aikana. Saadut tulokset ovat tarkkoja mutta koska oikea sähköverkko ei vastaa täysin laskennassa käytettyjä arvoja ja verkko ei ole täysin symmetrinen niin pieniä epätarkkuuksia voi testauksessa ilmetä. Releiden asettelussa ongelmana on että sähköasemilla olevilla virtamuuntajilla ei päästä haluttuun tarkkuuteen sammutetussa verkossa koska sammutetun verkon maasulkuvirta on huomattavasti pienempi kuin maasta erotetussa verkossa. Ongelma voidaan ratkaista vaihtamalla virtamuuntajat tai muuttamalla maasulkuvirran laskemistapaa ja näin ollen asettamalla suojauksen laukaisua korkeammalle. Laskentatapa olisi muuten sama kuin aiemmissa laskuissa mutta taustaverkkona on kaksi johtolähtöä yhden johtolähdön sijaan. Tässä tavassa olisi huomioitava että laukaisu hankalimmassa tilanteessa onnistuu nollajännitteen mukaan eli silloin kun on vain yksi johtolähtö kytkettynä taustaverkossa.

Opinnäytetyön aihe oli todella kiinnostava. Opinnäytetyössä päästiin perehtymään aiheeseen joka ei ollut ennestään tuttu. Opinnäytetyö tarjosi paljon uutta opittavaa.



## Lähteet

- Aura L & Tonteri A.J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Ensimmäinen painos Porvoo
- Elovaara J. & Haarla L. 2011. Sähköverkot 1. Ensimmäinen painos. Helsinki
- Elovaara J ja Laiho Y. 2001. Sähkölaitostekniikan perusteet. Neljäs painos. Helsinki
- Isomäki Rami 2010. Sammutetun keskijännite verkon kompensoilaitteiston lisävastuksen ohjaus. Vaasan Ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutus ohjelma. Opinnäytetyö.  
[www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16790/Isomaki\\_Rami.pdf](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16790/Isomaki_Rami.pdf)  
luettu 1.4.2016
- Lakervi E & Partanen J, 2009. Sähkönjakelutekniikka. Uudistettu toinen painos. Helsinki
- Oulun ammattikorkeakoulu ABB:n TTT käsikirja 2000-07 saatavissa  
[www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08\\_0\\_Maasulkusuojaus.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf)  
pdf luettu 11.4.2016
- Prysmian cables and systems Oy. 2009. Energia kaapelit tuotekuvasto